



УДК [574.632 : 574.587].087.1

Долговременные изменения качества воды и структуры сообществ донных животных в эстуарии р. Невы в условиях антропогенного воздействия

С.М. Голубков и Е.В. Балущкина*

Зоологический институт Российской академии наук, Университетская наб. 1, 199034 Санкт-Петербург, Россия; e-mails: golubkov@zin.ru; balushkina@zin.ru

Представлена 28 января 2023; после доработки 17 апреля 2023; принята 4 июля 2023.

РЕЗЮМЕ

В эстуарии р. Невы обнаружены 188 видов и надвидовых таксонов донных животных, из них 129 – в восточной части Финского залива. В настоящее время в сообществах зообентоса эстуария доминируют эврибионтные виды-индикаторы, населяющие «загрязненные» и «грязные» воды. Мы использовали интегральный показатель IP', специально разработанный для водоемов и рек северо-западной части России, для оценки качества воды и состояния экосистем эстуария р. Невы. Он основан на структурных характеристиках сообществ зообентоса и позволяет учитывать смешанное загрязнение токсичными и органическими веществами. В среднем качество вод Невской губы, оцениваемое по интегральному показателю (IP'), оставалось достаточно постоянным в течение 1994–2021 гг. В течение всего периода исследований, за исключением 2006 и 2015 гг., её воды оценивались как «загрязненные», что объясняется крупномасштабными дноуглубительными работами. За период 1982–2021 гг. среднее количество видов зообентоса на одной станции в Невской губе увеличилось почти в 2 раза, с 12 ± 1 вид в 1982 г. до 23 ± 2 вида в 2020 г. В курортном районе восточной части Финского залива значения видового богатства и индекса Шеннона были намного ниже, чем в Невской губе, и в среднем для одной станции варьировали от 5 ± 0.6 до 14 ± 4 видов и от 1.1 ± 0.2 до 2.3 ± 0.2 бит/экз. Эти низкие показатели видового разнообразия зообентоса обусловлены влиянием солёности воды, интенсивным эвтрофированием и загрязнением вод, вселением чужеродных видов в сообщества зообентоса. Помимо интенсивного антропогенного воздействия, динамика состояния зообентоса в этой части эстуария определялась колебаниями климата.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, биоиндикация, биоразнообразие, зообентос, качество воды, колебания климата, оценка

Long-term changes in water quality and structure of benthic animal communities in the Neva estuary under anthropogenic stress

S.M. Golubkov and E.V. Balushkina*

Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Universitetskaya Emb. 1, 199034 Saint Petersburg, Russia; e-mails: golubkov@zin.ru; balushkina@zin.ru

Submitted January 28, 2023; revised April 17, 2023; accepted July 4, 2023.

* Автор-корреспондент / Corresponding author

ABSTRACT

In the Neva River estuary, 188 species and taxa of a higher rank of benthic animals were found, of which 129 were found in the eastern part of the Gulf of Finland. At present, the zoobenthos of the estuary is dominated by eurybiont species inhabiting polluted waters. We used integrated index IP' specially devised for water-bodies and rivers of the north-western Russia to assess the water quality and a state of ecosystems of the Neva estuary. It is based on structural parameters of zoobenthic communities and makes it possible to take into consideration the pollution by toxic and organic substances. On average the water quality of the Neva Bay assessed from IP' values was relatively stable during 1994–2021. It was assessed as “polluted” with the exception of 2006 and 2015 caused by large-scale dredging works. In the period 1982–2021, the average number of zoobenthos species at one station in the Neva Bay almost doubled, from 12 ± 1 species in 1982 to 23 ± 2 species in 2020. In the resort area of the eastern Gulf of Finland, the values of species richness and the Shannon index were much lower than in the Neva Bay, and on average for one station varied from 5 ± 0.6 to 14 ± 4 species and from 1.1 ± 0.2 to 2.3 ± 0.2 bit/ind. This is caused by the influence of salinity, eutrophication and pollution, and invasion of alien species. In addition to intense anthropogenic impact, the dynamics of the state of zoobenthos in this part of the estuary was determined by climate fluctuations.

Key words: anthropogenic stress, bioindication, biodiversity, zoobenthos, water quality, climatic fluctuations, assessment

ВВЕДЕНИЕ

Термин «качество воды» до 2002 г. означал совокупность химического, биологического состава и физических свойств воды, определяющих ее пригодность для конкретных видов водопользования. Оценка «качества воды» проводилась путем определения соответствия этих параметров нормам: предельно допустимым концентрациям (ПДК), установленным для отдельных классов вод.

Современная оценка качества воды и состояния пресноводных водоемов в России включает совокупность критериев, оценивающих специфику структурно-функциональной организации сообществ гидробионтов и динамику развития водных биоценозов, т.е. критериев, связанных с «обеспечением устойчивого функционирования естественных экологических систем и предотвращением их деградации» (Федеральный закон [Federal Law] 2002).

В 90-е гг. прошлого столетия в России многие исследователи указывали на неэффективность использования ПДК и предельно допустимых уровней (ПДУ) для оценки качества воды и состояния водоемов. Основные недостатки ПДК заключаются в том, что они устанавливаются как универсальные нормативы для широкого круга водных экосистем без учета специфики их функционирования в различных регионах. Преодолеть неэффективность использования ПДК предлагалось в рамках биотической концепции

экологического контроля (Левич [Levich et al.] 2004; Левич и др. [Levich et al.] 2011), при которой оценка состояния природных экосистем должна проводиться не по уровню воздействия факторов среды, а по характеристикам биологических компонент «биологических индикаторов». При этом границы нормы факторов следует вводить как уровни воздействия, не нарушающие норму экологического состояния, установленную по биологическим индикаторам. Авторы биотической концепции экологического контроля предлагали подход к поиску взаимосвязей между биотическими и абиотическими характеристиками экосистем и комплекс методик для экологического контроля по совместным данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов (Левич и др. [Levich et al.] 2011). Биотическая концепция экологического контроля получила поддержку в долговременных исследованиях водоемов и водотоков северо-запада России, в частности, эстуария р. Невы и восточной части Финского залива (Балушкина [Balushkina] 2011; Балушкина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2015, 2018; Balushkina and Golubkov 2018; Golubkov et al. 2020).

Определение целей экологического нормирования дано в работе Ю.А. Израэля и В.А. Абакумова (Израэль и Абакумов [Israel and Abakumov] 1991): «Экологическое нормирование направлено на охрану природы и здоровья человека и экологическое регулирование использования

водных ресурсов». Основная экологическая цель «Водной директивы Европейского Союза» (Water Framework Directive – WFD), установленная для поверхностных вод, – достижение хорошего экологического статуса для всех водных экосистем. Основой экологического статуса является «экологическое» качество воды, и чем выше качество воды, тем большее число различных таксонов и функциональных групп может обитать в одном водном объекте (Directive 2000/60/EC... 2000), т.е. как и при экологическом нормировании, оценка качества воды проводится по биологическим показателям.

Оценка и прогнозирование состояния водных экосистем являются важнейшими вопросами современной гидробиологии, которые тесно связаны с решением проблем защиты и реабилитации окружающей среды. Состояние эстуария р. Невы сотрудники Зоологического института РАН (ЗИН РАН) исследуют с 1982 г. Долговременные исследования Зоологического института показывают, что состояние биологических сообществ восточной части Финского залива напрямую связано с качеством воды и донных отложений, отражая такие антропогенные воздействия, как эвтрофирование открытых и прибрежных вод Финского залива, а также загрязнение их токсическими веществами. Сообщества донных животных эстуария р. Невы сформировались под влиянием эвтрофирования и загрязнения токсическими и органическими веществами и в настоящее время в значительной степени утратили свой первоначальный облик (Balushkina and Golubkov 2018; Golubkov et al. 2019). Наиболее отрицательным по степени антропогенного воздействия был период до 1978 г., когда очистные сооружения в г. Ленинград отсутствовали, и все стоки города поступали в р. Неву и ее эстуарий, что привело к почти полному исчезновению реликтовых ракообразных и массовому развитию олигохет в верхней части эстуария. Снижение видового богатства донных животных в Невской губе происходило главным образом за счет исчезновения оксифильных организмов, не переносящих загрязнения грунтов нефтепродуктами и другими компонентами сточных вод (Balushkina and Golubkov 2018). В середине 1980-х гг. доминирующими группами донных животных в Невской губе

стали малощетинковые черви (Oligochaeta), среди которых доминировали представители сем. Tubificidae – индикаторы «загрязненных» и «грязных» вод, а также мелкие двустворчатые моллюски сем. Pisidiidae. Биомасса Pisidiidae достигала очень высоких значений – до 1.0 кг/м², а общая биомасса зообентоса достигла 1.5 кг/м² в восточной части Невской губы (Balushkina and Finogenova 2003; Alimov and Golubkov 2008; Golubkov 2008; Golubkov and Alimov 2010; Telesh et al. 2008). Высокая биомасса зообентоса наблюдалась в восточной части Невской губы в зоне гидродинамического барьера, где имело место резкое снижение скорости водного потока. В 1990-е гг. в Невской губе произошли масштабные изменения. Средний уровень биомассы бентоса снизился с 100–150 г/м² в 1980 г. до примерно 50 г/м² в 1990 г. и до 1–17 мг/м² в начале 2000-х гг. В настоящее время в сообществах зообентоса эстуария доминируют эврибионтные виды-индикаторы, населяющие «загрязненные» и «грязные» воды, положительно реагирующие на увеличение органического загрязнения и эвтрофирование экосистемы и переносящие высокие концентрации тяжелых металлов и поллютантов. В то же время видовое разнообразие в сообществах донных животных эстуария динамично меняется, что связано со степенью антропогенного воздействия на его экосистему, изменениями климата и вселением чужеродных видов (Golubkov and Alimov 2010; Balushkina and Golubkov 2018; Golubkov et al. 2019, 2021).

Сохранение и восстановление биологического разнообразия более 10 лет оставалось одной из приоритетных задач «Плана действий по Балтийскому морю» (ПДБМ). Большое внимание уделялось в последние годы оценке состояния Балтийского моря и нагрузок, влияющих на него. Это способствовало разработке научно обоснованного понимания уровней нагрузок и биоразнообразия. В рамках XXI Международного экологического форума «День Балтийского моря» 23–24 марта 2021 г. в Санкт-Петербурге была дана оценка выполнения ПДБМ в 2007–2021 гг., а также обсуждены актуальные вопросы обновления ПДБМ и пересмотр его целей до 2030 г. В числе приоритетных на период 2021–2030 гг. стали цели в области устойчивого развития региона, в том числе сокращение

поступления биогенов в Балтийское море, сохранение биоразнообразия, повышение качества воды, что должно способствовать рациональному использованию водоема и его ресурсов.

Цель настоящей работы состояла в изучении сообществ донных животных эстуария р. Невы и изменений в них, происходящих под влиянием естественных и антропогенных факторов, а также в оценке качества вод и состояния экосистем эстуария методами биоиндикации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Область исследования

Река Нева – самая крупная по расходу воды из рек, впадающих в Балтийское море; с ее стоком в Финский залив поступает до 75% общего притока пресной воды и большое количество биогенных элементов (Balushkina and Golubkov 2018).

Невская губа – верхняя часть эстуария р. Невы, отделенная в 1980-х гг. от остальной акватории комплексом защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (дамбой), соединяется с нижними частями эстуария водопропускными отверстиями и воротами морского фарватера шириной 350 м и представляет собой мелководную (средняя глубина 4 м), пресную (средняя соленость 0.06‰), хорошо прогреваемую искусственную лагуну с площадью 329 км² (Рис. 1). Преобладающие глубины в этой части эстуария составляют 3–5 м, в районе впадин дна – до 7–8 м. Одной из основных особенностей Невской губы является высокая скорость обмена воды со средним временем пребывания воды 5.5 сут. (Telesh et al., 2008; Фруммин и Басова [Frumin and Basova] 2008).

Средняя часть эстуария р. Невы, прилегающая к Курортному району Санкт-Петербурга, имеет глубины 13–25 м и соленость 1–3‰. Она ограничена на востоке дамбой и включает станции мелководной зоны 19, 20, 21 и 26 с глубинами не более 15 м, а также станции 22–23 с глубинами до 30 м (Рис. 1).

За последние 30 лет трофический статус эстуария р. Невы значительно возрос (Golubkov 2009), и в настоящее время его воды характеризуются как эвтрофные. В средней части эстуария доминирующей группой фитопланктона

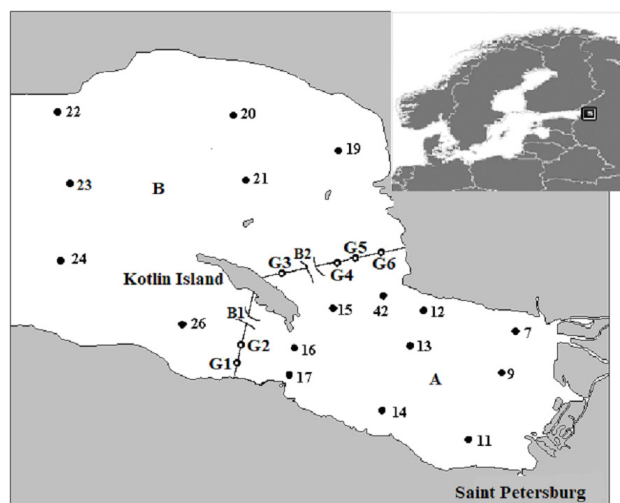


Рис. 1. Невская губа (А) и курортный район восточной части Финского залива: средняя часть эстуария реки Нева (В) с указанием станций отбора проб (номера). В1, В2 – ворота для судов; G1–G6 – гидрозатворы Санкт-Петербургского противопаводкового сооружения.

Fig. 1. Neva Bay (A) and the resort area of the eastern Gulf of Finland: the middle part of the Neva Estuary (B) with indication of sampling stations (numbers). В1, В2 – gates for ships; G1–G6 – hydraulic seals of the Saint-Petersburg anti-flood structure.

в летнее время стали цианобактерии; периодически наблюдается массовое развитие видов, выделяющих цианотоксины, опасные для гидробионтов и человека (Golubkov et al. 2021a). Эвтрофирование вод привело к развитию придонной гипоксии, разрушению аборигенных сообществ донных животных, вселению чужеродных видов, изменению конфигурации пищевых цепей и подрыву кормовой базы рыб (Golubkov and Alimov 2010; Golubkov et al. 2019; Golubkov et al. 2021b).

Значительный отрицательный эффект на экосистемы эстуария оказывало периодически возобновляемое крупномасштабное гидростроительство, проводимое в Невской губе: строительство портов, прокладка фарватеров и намыв новых территорий, в результате чего в воду поступало огромное количество минеральной взвеси. Последствия таких работ приводили, в частности, к значительному снижению первичной продукции, уменьшению биомассы и биологического разнообразия фитопланктона (Golubkov and Golubkov 2022; Golubkov et al. 2023).

Таблица 1. Количество станций в Невской губе и курортном районе восточной части Финского залива.**Table 1.** The number of stations in the Neva Bay and the resort area of the eastern Gulf of Finland.

Район исследования Study area	Годы / Years								
	1994	1995	1996	1997	1998	2001	2002	2003	2004
Невская губа Neva Bay	5	5	31	36	34	23	14	11	10
Финский залив Gulf of Finland	6	6	14	24	–	6	6	6	6
Район исследования Study area	Годы / Years								
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Невская губа Neva Bay	20	10	10	10	11	9	12	10	15
Финский залив Gulf of Finland	6	6	–	5	4	5	4	4	5
Район исследования Study area	Годы / Years								
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	–
Невская губа Neva Bay	10	10	11	11	11	10	10	10	–
Финский залив Gulf of Finland	7	6	7	7	7	7	7	7	–

Методы

Для анализа видового состава, количественного развития зообентоса, оценки качества вод и состояния экосистем Невской губы и курортного района восточной части Финского залива использованы пробы макрозообентоса, собранные сотрудниками лаборатории пресноводной и экспериментальной гидробиологии ЗИН РАН. Число станций, исследованных в разные годы в Невской губе и курортном районе восточной части Финского залива, представлено в Табл. 1. Расположение исследованных станций представлено на Рис. 1.

Пробы зообентоса отбирали с помощью дночерпателя Ван-Вина с площадью захвата 0.025 м². На каждой станции отбирали не менее двух проб. Пробы промывали через газ № 23 и фиксировали формалином. В дальнейшем через 2–3 месяца в лабораторных условиях выбирали животных из остатков грунта в пробах, сортировали по таксонам надвидового уровня и взвешивали. Определение животных до вида в 1982–2019 гг. проводили сотрудники ЗИН РАН: олигохет – Н.П. Финогенова и И.Г. Ципленкина, моллюсков – С.М. Голубков, хирономид – Е.В. Балужкина, амфипод и полихет – А.А. Максимов. Списки видов донных животных, обнаруженных в разных частях

эстуария, опубликованы в статье Балужкиной и др. [Balushkina et al.] (2008a) и уточнены в более поздних работах (Балужкина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2015; Maximov 2015; Balushkina and Golubkov 2018). Для количественной оценки пространственного распределения и динамики структурных характеристик зообентоса сообщества донных животных на каждой станции характеризовали определенным набором показателей: видовой состав, число видов (N_{sp} , видов на станцию), индекс видового разнообразия Шеннона (H , бит/экз.), численность (N , экз./м²) и биомасса (B , г/м²), а также рассчитанные на их основе индексы, учитывающие индикаторную значимость как отдельных видов, так и таксонов более высокого ранга. Для сравнительной характеристики изменений биологического разнообразия, количественного развития макрозообентоса и качества воды в разные периоды использованы материалы по 43 станциям Невской губы, позволяющие рассчитать все необходимые современные индексы. Все простейшие статистические расчеты выполнены в программе Excel. Все корреляционные и регрессионные анализы выполняли с помощью статистической программы Statistika 8.0.

Для оценки качества вод водоемов и водотоков северо-запада России использовали ин-

Таблица 2. Классы качества вод и состояния экосистем по показателям зообентоса St, No/Nc, Kch, 1/BI, IP' (%).**Table 2.** Classes of water quality and state of ecosystems by zoobenthos indices St, No/Nc, Kch, 1/BI and IP'.

Класс вод Class of water	Качество вод Water quality	Состояние экосистемы State of ecosystem	IP' %
1	Очень чистые / Very clean		<9.05
2	Чистые / Clean	Относительно удовлетворительное Relatively satisfactory	9.05–29.22
3	Умеренно загрязненные / Moderately polluted	Напряженное / Tense	29.22–53
4	Загрязненные / Polluted	Критическое / Critical	53.01–66.25
4–5	Загрязненные–грязные / Polluted–Dirty	Кризисное / Crisis	66.25–73.95
5	Грязные / Dirty	Катастрофическое / Catastrophic	73.95–100

тегральный показатель IP', основанный на структурных характеристиках донных сообществ и позволяющий учитывать влияние загрязнения токсическими и органическими веществами (Balushkina 2009). В IP' входят индекс сапротоксности В.А. Яковлева St (Яковлев [Jakovlev] 1988), биотический индекс Вудивисса (BI) (Woodiwiss 1964), индекс Гуднайта и Уитлея (No/Nc) (Goodnight and Whitley 1961) и индекс Е.В. Балускиной (Kch) (Балускина [Balushkina] 1987). Последние четыре индекса были преобразованы и выражены в процентах от максимальных значений. С увеличением загрязнения значения индексов St, No/Nc и Kch возрастают, а значения BI снижаются, поэтому мы выразили величину BI обратной его значению величиной (1/BI), и в этом случае биотический индекс приобретает ту же направленность, что и у остальных трех показателей, т.е. по мере возрастания загрязнения увеличивается. Различная размерность выбранных показателей также затрудняет сравнение их абсолютных величин. Поскольку значения индекса No/Nc выражены в процентах, показатели St, Kch и 1/BI также были переведены в проценты от их максимальных значений. Интегральный показатель IP' рассчитывался как среднее значение из входящих в него показателей.

Для оценки состояния экосистем использовали классификацию степени экологического неблагополучия, представленную в методическом руководстве (Критерии... [Criteria...] 1992). Градации качества вод и состояния экосистем представлены в Табл. 2. Детальное описание значений индексов No/Nc St, Kch и 1/BI в выделенных классах вод приведены в ряде работ (Балускина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2015; Balushkina and Golubkov 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Состав сообществ зообентоса

В эстуарии р. Невы обнаружены 188 видов и надвидовых таксонов донных животных, 129 из которых – в восточной части Финского залива, из них 68 – общие для Невской губы и восточной части Финского залива. В сообществах зообентоса Невской губы доминировали эврибионтные виды-индикаторы, населяющие «загрязненные» и «грязные» воды, положительно реагирующие на увеличение органического загрязнения и эвтрофирование экосистемы. Доля численности популяций подкласса Oligochaeta: *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862 и *Potamothrix hammoniensis* (Michaelson, 1901), являющихся показателями высокой степени загрязнения органическими и токсическими веществами (полисапротоксной зоны), составляла на разных участках Невской губы от 50 до 80% от суммарной численности донных животных, кроме станции 9 (Рис. 1). Повсеместно отмечены виды рода *Aulodrilus* – *A. japonicus* Yamaguchi, 1953, *A. limnobius* Bretscher, 1899, и *A. pigueti* Kowalewski, 1914. Виды сем. Naididae: *Stylaria lacustris* (Linnaeus, 1758), *Arcteonais lomondi* (Martin, 1907), *Piguetiella blanci* (Piguet, 1906), встречались в большинстве изученных биотопов. Виды сем. Chironomidae – *Procladius (Holotanypus) ferrugineus* (Kieffer, 1918), *P. (Holotanypus) choreus* (Meigen, 1804), *Chironomus f.l. plumosus* (Linnaeus, 1758) и *Cryptochironomus defectus* (Kieffer, 1913), наиболее обычны и распространены по всей акватории Невской губы, в транзитной зоне на чистых и заиленных песках в районе 7, 9 и 11 станций многочисленны также *Psectrocladius simulans* (Johannsen, 1937), *Cladotanytarsus mancus* (Walker, 1856), *Microtendipes pedellus* (De Geer, 1776).

Таблица 3. Средние значения интегрального показателя (IP'), числа видов на станции (Nsp), индексов видового разнообразия Шеннона (H) и ошибки их средних значений в Невской губе.

Table 3. Average values of the of the integrated index (IP'), number of species at the station (Nsp) and Shannon species diversity indices (H), errors of their average values and water classes in the Neva Bay.

Годы Years	Средние значения интегрального показателя IP' и ошибки его средних значений Average values of the integrated index IP' and errors of their average values	Средние значения числа видов на станции (Nsp) и ошибки их средних значений Average values of the number of species at station (Nsp) and errors of their average values	Средние значения индексов видового разнообразия Шеннона H и ошибки их средних значений Average values of the Shannon species diversity index H and errors of their average values	Классы вод Classes of waters
	%	Nsp	бит/экз. / bit/ind.	№
1982	62.7±1.9	12±1	2.0±0.2	4
1983	66.1±1.7	11±1	2.0±0.1	4
1994	64.5±2.0	11±1	2.0±0.2	4
1995	65.4±1.9	13±2	2.5±0.2	4
1996	58.6±1.4	18±1	2.5±0.1	4
1997	60.1±1.7	19±1	2.7±0.1	4
1998	64.0±1.4	15±1	2.3±0.1	4
2001	63.4±1.8	21±1	2.6±0.1	4
2002	56.8±2.2	23±2	3.0±0.2	4
2003	60.9±1.8	20±2	3.0±0.1	4
2004	65.3±1.6	18±2	2.3±0.2	4
2005	66.0±1.8	13±2	2.4±0.2	4
2006	68.2±4.4	15±2	2.6±0.2	4–5
2007	63.4±2.8	14±1	2.4±0.2	4
2008	61.2±2.6	19±1	3.0±0.2	4
2009	61.0±2.8	17±2	2.8±0.2	4
2010	59.6±2.4	21±3	3.0±0.3	4
2011	58.7±1.7	20±1	3.1±0.2	4
2012	62.8±2.2	18±1	2.8±0.2	4
2013	64.1±3.0	20±3	2.9±0.2	4
2014	63.2±2.1	20±2	3.0±0.3	4
2015	67.6±2.8	15±2	2.7±0.2	4–5
2016	65.3±2.0	20±1	3.0±0.3	4
2017	61.0±1.2	21±2	2.9±0.2	4
2018	63.4±2.8	21±1	3.2±0.2	4
2019	64.4±2.9	21.0±1	3.1±0.2	4
2020	61.7±3.7	23±2	3.1±0.2	4
2021	64.0±2.7	19±2	3.0±0.2	4

Мелкие двустворчатые моллюски сем. Pisidiidae: *Henslowiana suecica* (Clessin, 1873), *Europisidium tenuilineatum* Stelfox, 1918, *Pisidium amnicum* (Müller, 1774) и сем. Sphaeriidae: *Amesoda draparnaldi* (Clessin, 1879), достигали наибольшего развития в центральной части губы. Значительные поселения крупных двустворчатых моллюсков сем. Unionidae: *Unio pictorum* (Linnaeus, 1758), *U. tumidus* Philipsson, 1758, *Anodonta* sp., были обнаружены по всей губе, за исключением станций 7 и 9 (Рис. 1).

В макрозообентосе средней части эстуария в восточной части Финского залива преобладали пресноводные формы, составляющие более 60% от общего числа найденных видов. Вследствие вертикального градиента солёности количество их быстро убывало с глубиной. В диапазоне глубин 10–15 м зарегистрированы около 42 видов пресноводных животных; наиболее богатой была фауна олигохет мелководных районов с глубинами менее 15 м, где отмечены 28 видов. Достаточно богато были представлены

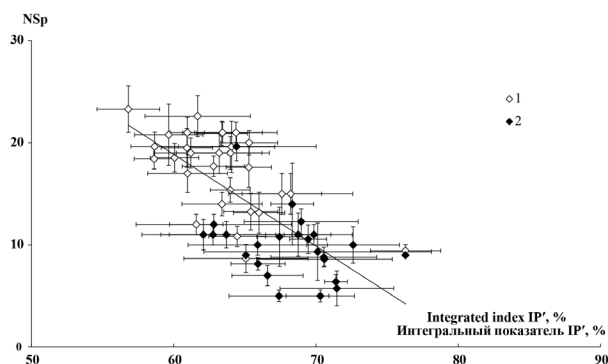


Рис. 2. Зависимость числа видов на станции (Nsp) от интегрального показателя (IP', %) в Невской губе (1) и средней части эстуария реки Нева (2). $R = 0.71$, $p = 0.05$.

Fig. 2. Dependence of the number of species at the station (Nsp) on the integrated index (IP', %) in the Neva Bay (1) and the middle part of the Neva Estuary (2). $R = 0.71$, $p = 0.95$.

личинки сем. Chironomidae (18 видов и личиночных форм), но их численность резко уменьшалась при солености более 3‰, и в составе зообентоса оставалось только два вида – *P. ferrugineus* и *Ch. plumosus*. Аналогичное распределение было характерно и для моллюсков. Из восьми видов семь были встречены на глубинах менее 15 м. Основное отличие зообентоса Курортного района восточной части Финского залива – отсутствие крупных двустворчатых моллюсков унионид. В период исследований в мелководной зоне Курортного района по численности и биомассе доминировали олигохеты *P. hammoniensis* и *L. hoffmeisteri* – показатели «грязных» вод; их численность достигала 60% от суммарной численности зообентоса. На станции 26 многочисленными были хирономиды *Ch. plumosus*, *P. ferrugineus*, *P. choreus* и *Micropectra curvicornis* Tshernovskij, 1949. В 90-е гг. изредка встречались мелкие двустворчатые (Bivalvia) и брюхоногие (Gastropoda) моллюски. В 2001 г. впервые появился вид полихет *Marenzelleria neglecta* Sikorski et Bick, 2004, а через несколько лет – *Marenzelleria arctica* (Chamberlin, 1920). Этот вид полихет стал одним из доминирующих видов зообентоса в восточной части Финского залива.

Средние для акватории Невской губы значения числа видов на станциях возрастали с некоторыми колебаниями почти в два раза – от 11 ± 1 в 1982 г. до 23 ± 2 в 2020 г. и 19 ± 2 в 2021 г. (Табл. 3). Сообщества донных животных в Ку-

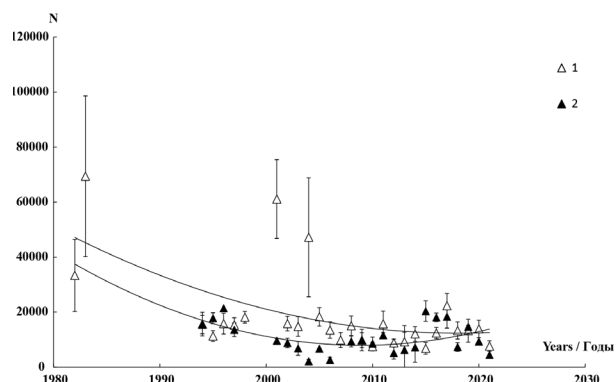


Рис. 3. Средние значения численности (N, экз./м²) макрозообентоса в Невской губе (1) и средней части эстуария реки Нева (2) в 1982–2021 гг.

Fig. 3. Average values of the number (N, ind./m²) of macrobenthos in the Neva Bay (1) and the middle part of the Neva Estuary (2) in 1982–2021.

рортном районе восточной части Финского залива были в 1994–2021 гг., как правило, небогаты и состояли минимально из 5 ± 1 , максимумом – из 14 ± 4 видов на станциях. Средние для акватории Невской губы и Курортного района значения числа видов на станциях 1994–2021 гг. в значительной степени зависели от качества воды (Табл. 4). Вследствие более сильного загрязнения видовое богатство донных животных в Курортном районе восточной части Финского залива было значительно ниже, чем в Невской губе. Величины индексов видового разнообразия изменялись в этом районе от 1.1 ± 0.2 до 2.3 ± 0.4 бит/экз. и также были значительно ниже, чем в Невской губе (Табл. 3, 4, Рис. 2).

В период с 1982 по 1994 гг. в Невской губе произошло значительное снижение средней для акватории Невской губы численности от 69398 ± 29220 до 15653 ± 4276 экз./м² и биомассы донных животных от 96.40 ± 37.08 до 16.31 ± 3.43 г/м²; численность зообентоса снизилась в 4.4 раза, а биомасса – в 6 раз (Рис. 3). В основном снижение в эти годы происходило за счет численности и биомассы мелких моллюсков пизидий и олигохет. С 1994 до 2006 гг. численность менялась незначительно – от 11320 ± 1935 до 18305 ± 3373 экз./м², за исключением 2001 и 2004 гг., когда она достигала 61126 ± 14316 и 47219 ± 21619 экз./м² вследствие вспышки численности мелких олигохет п/сем. Naididae. В последующие годы (2007–2021 гг.) численность

Таблица 4. Средние значения интегрального показателя (IP'), числа видов на станции (Nsp) и индексов видового разнообразия Шеннона (H), ошибки их средних значений и классы вод в курортном районе восточной части Финского залива.

Table 4. Average values of the integrated index (IP'), number of species at the station (Nsp) and Shannon species diversity indices (H), errors of their average values and water classes in the resort area of the eastern Gulf of Finland.

Годы Years	Средние значения интегрального показателя IP' и ошибки его средних значений Average values of the integrated index IP' and errors of their average values	Средние значения числа видов на станции (Nsp) и ошибки их средних значений Average values of the number of species at station (Nsp) and errors of their average values	Средние значения индексов видового разнообразия Шеннона H и ошибки их средних значений Average values of the Shannon species diversity index H and errors of their average values	Классы вод Classes of waters
	%	Nsp	бит/экз. / bit/ind.	
1994	70.1±8.0	9±3	1.7±0.2	4–5
1995	67.4±1.6	11±3	2.1±0.3	4–5
1996	69.5±1.3	11±1	1.8±0.2	4–5
1997	66.6±1.5	7±1	1.6±0.3	4–5
2001	65.9±1.9	8±1	1.5±0.3	4
2002	70.3±2.4	5±1	1.4±0.4	4–5
2003	71.4±0.8	6±1	1.1±0.2	4–5
2004	71.5±4.0	6±2	1.2±0.3	4–5
2005	68.7±2.3	11±2	1.6±0.3	4–5
2006	67.4±3.5	5±1	1.4±0.2	4–5
2008	70.6±3.7	9±1	1.4±0.3	4–5
2009	72.6±3.3	10±2	1.9±0.3	4–5
2010	70.6±4.8	9±1	1.7±0.3	4–5
2011	68.2±5.6	8±2	1.8±0.3	4–5
2012	63.7±4.6	11±1	2.3±0.2	4
2013	65.1±4.4	9±1	1.9±0.4	4
2014	69.9±2.7	11±1	1.9±0.1	4–5
2015	68.3±1.54	14±4	2.3±0.4	4–5
2016	62.8±5.5	12±1	2.0±0.2	4
2017	62.1±2.4	11±2	1.8±0.3	4
2018	63.4±4.9	10±1	2.0±0.2	4
2019	62.8±5.0	11.0±1	2.0±0.1	4
2020	69.0±4.01	12±1	2.1±0.2	4–5
2021	76.3±2.47	9±1	2.0±0.2	5

донных животных с некоторыми колебаниями последовательно снижалась почти в 2 раза (от 15054 ± 3549 до 7690.00 ± 1905 экз./м²), что происходило под воздействием крупномасштабных гидротехнических работ в этот период. Средняя численность зообентоса Курортного района изменялась в широких пределах: с 1996 г. по 2004 г. она снизилась в 10 раз, от 21413 ± 3317 экз./м² до 2135 ± 1729 экз./м², и затем претерпевала значительные колебания, возрастая до 20350 ± 8915 в 2015 г. и снижаясь до 4440 ± 555 экз./м² в 2021 г. (Рис. 3).

Средняя биомасса макрозообентоса Невской губы в 1994–2021 гг. постепенно снижалась от

16.31 ± 3.43 в 1994 г. до 1.50 г/м² в 2015 г. и затем с некоторыми колебаниями повышалась в 2021 г. до 21.80 ± 13.20 , что было связано в основном со снижением и повышением биомассы олигохет (Рис. 4). Средняя биомасса донных животных Курортного района была наиболее высокой в 90-е гг., и ее максимальное значение 40.4 ± 19.2 г/м² было отмечено в 1994 г. В последующие годы наблюдалось отчетливо выраженное снижение биомассы донных животных до минимального значения в 2015 г. – 3.34 ± 0.84 г/м² и затем с существенными колебаниями (с повышением до 21.00 ± 4.50 г/м² в 2017 г.) последовало снижение биомассы до 7.00 ± 2.80 г/м² в 2021 г. (Рис. 4).

Оценка качества вод и состояния экосистем

Индикаторная значимость многих видов и таксонов донных животных более высокого ранга достаточно хорошо изучена, что позволяет проводить оценку качества вод. Величины интегрального показателя IP' представлены в Табл. 3, а величины его отклонения от многолетних средних, равных 62.9% для Невской губы и 67.7% для средней части эстуария – на Рис. 5. Воды Невской губы в 80-е гг. оценивали по IP' как «загрязненные», а состояние экосистемы – как «критическое» (4-й класс), однако с учетом ошибок средних значений IP' в 1983 г. можно говорить о категории «загрязненные–грязные», а состояние экосистемы рассматривать как «кризисное» (4–5-й класс). Видовое богатство и видовое разнообразие были близки к наблюдаемым в начале 90-х гг. (Табл. 2, 3).

В 1996–2003 гг. наблюдались процессы восстановления экосистемы Невской губы. Наиболее значительные изменения происходили в области наибольшей проточности Невской губы (Рис. 1, станции 7, 9, 11). В этой части Невской губы появились чистоводные виды хирономид п/сем. Diamesinae и Orthocladiinae, на всей акватории наблюдали снижение биомассы пизидид и увеличение биомассы более чистоводных крупных двустворчатых моллюсков, унионид. Средние для Невской губы значения IP' снижались с некоторыми колебаниями с 64.5 ± 2.0 в 1994 г. до 56.8 ± 2.2 % в 2002 г. Среднее для акватории Невской губы число видов донных животных возрастало от 11 ± 1 в 1994 г. до 23 ± 2 на станции в 2002 г., индекс видового разнообразия возрастал от 2 ± 0.2 до 3 ± 0.2 бит/экз. (Табл. 3). В целом состояние экосистемы Невской губы в этот период оценивалось как «критическое», а воды – как «загрязненные» (4-й класс). Минимальные средние для акватории Невской губы значения $IP' = 56.8 \pm 2.2$ % в 2002 г. были близки к границе «умеренно загрязненных» вод – 53% (3-й класс вод), однако этот год стал завершающим для периода восстановления экосистемы Невской губы на фоне снижения антропогенной нагрузки (Табл. 2, 3).

Последующие годы (2004–2007) сопровождалось возрождением промышленности г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области, строительством портов и активизацией судо-

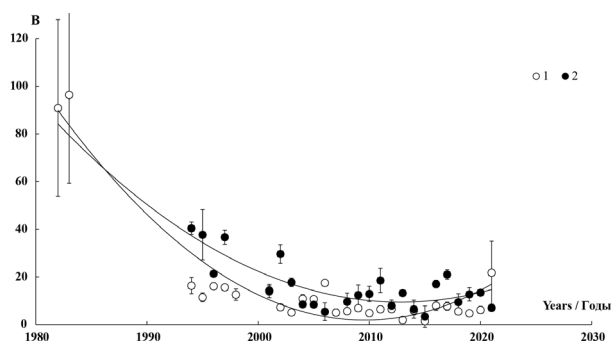


Рис. 4. Средние значения биомассы (B , $г/м^2$) макробентоса в Невской губе (1) и средней части эстуария реки Нева (2) в 1982–2021 гг.

Fig. 4. Average values of the biomass (B , $г/м^2$) of macrobenthos in the Neva Bay (1) and the middle part of the Neva Estuary (2) in 1982–2021.

ходства, связанного с транспортировкой энергоносителей. Проведение работ по благоустройству морского фасада г. Санкт-Петербурга и завершение строительства защитных сооружений сопровождалось крупномасштабными гидротехническими строительными работами. Средние значения интегрального показателя IP' зообентоса Невской губы в этот период были выше многолетних средних (Рис. 5) и достигли максимума (68.2 ± 4.4 %) в 2006 г. (Табл. 3). Качество воды в этот период снизилось с 4-го класса, «загрязненные», до переходного 4–5-го класса, «загрязненные–грязные» воды. Состояние экосистемы Невской губы в 2006 г. было наихудшим в течение периода исследований и оценивалось как «кризис» (Табл. 2, 3). Средние для Невской губы значения числа видов донных животных и индексов видового разнообразия в течение периода 2004–2007 гг. снижались от 20 ± 2 видов на станциях и от 3 ± 0.1 до 2.6 ± 0.2 бит/экз. соответственно (Табл. 3). Позже средние для Невской губы значения числа видов донных животных и индексов видового разнообразия повышались от 14 ± 1 в 2007 г. до 20 ± 1 видов на станциях в 2011 г., и от 2.4 ± 0.2 до 3.1 ± 0.2 бит/экз. соответственно (Табл. 3).

В период с 2008 по 2012 гг. происходило восстановление экосистемы Невской губы. Это положительно сказалось на состоянии сообществ донных животных и величинах интегрального показателя IP' (Рис. 5). Средние для Невской губы значения IP' на этом этапе снижались

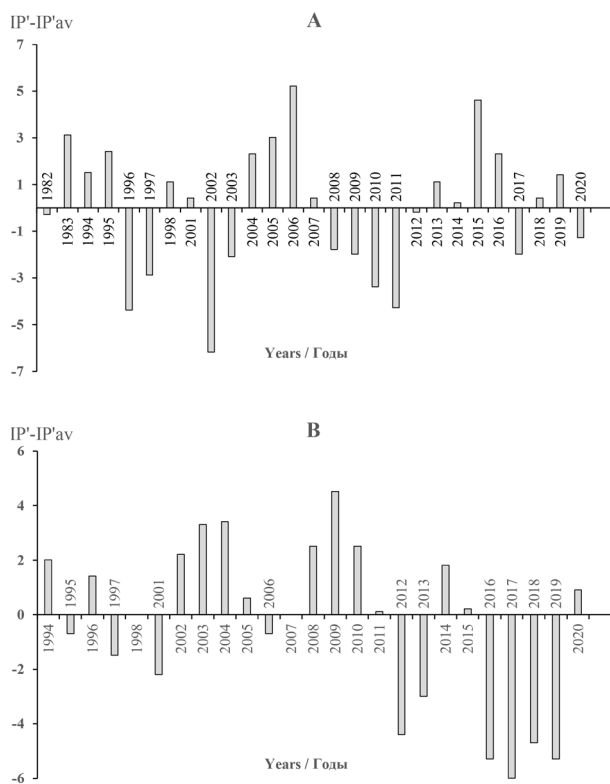


Рис. 5. Отклонения величины интегрального показателя IP' от многолетних средних значений ($IP' - IP'_{av}$, %) в Невской губе (А) и средней части эстуария реки Невы (В).

Fig. 5. Deviations of the value of the integrated index IP' from long-term average values ($IP' - IP'_{av}$, %) in the Neva Bay (A) and the middle part of the Neva Estuary (B).

с некоторыми колебаниями с 63.4 ± 2.8 в 2007 г. до 58.7 ± 1.7 в 2011 г. и были лучшими с 2002 г. Воды большей части акватории Невской губы оценивали в 2011 г. как воды 4-го класса – «загрязненные», за исключением станции 9, воды которой относили к 3-му классу (Табл. 3, Рис. 1). Начиная с 2013 г. наблюдалось ухудшение состояния зообентоса Невской губы. В этот период величины IP' были в основном выше многолетних средних величин этого показателя (Рис. 5).

По сравнению с Невской губой условия обитания животных в восточной части Финского залива были более неблагоприятными. Многолетние средние величины IP' для средней части эстуария р. Невы были значительно выше, чем для Невской губы. При этом в 1994–2011 гг. значения IP' были выше многолетних средних (Рис. 5). Средние для средней части эстуария значения интегрального показателя IP'

за период 1994–2011 гг. характеризовали воды этого района как «загрязненные–грязные» (IP' от 70.1 ± 8.0 до 72.6 ± 3.3 ; 4–5-й класс вод) за исключением 2001 г. ($IP' = 65.9 \pm 1.9$; 4-й класс вод) (Табл. 4). Средние значения числа видов зообентоса на станциях средней части эстуария были значительно ниже, чем в Невской губе и изменялись в этот период почти в два раза, от 5 ± 1 до 11 ± 3 видов на станции. Средние значения индексов видового разнообразия Шеннона в средней части эстуария также были значительно ниже, чем в Невской губе, и изменялись почти в 2 раза, от 1.1 ± 0.2 до 2.1 ± 0.3 бит/экз. (Табл. 4). В курортном районе восточной части Финского залива в 2011 г. воды 4-го класса отмечали лишь на станции 22, все остальные участки оценивали как «загрязненные–грязные», что определило среднюю оценку вод на 1 класс ниже (Рис. 1).

Период 2012–2015 гг. сопровождался крупномасштабными гидротехническими работами в Невской губе: строительство морского многофункционального перегрузочного комплекса «Бронка» и подходного к нему фарватера. В 2013 г. воды большей части Невской губы и Курортного района восточной части Финского залива оценивали как «загрязненные», и только на одной станции 9 ($IP' = 49.9\%$), расположенной в зоне наибольшей проточности, воды были оценены как «умеренно загрязненные» (Рис. 1). Наихудшее качество вод («грязные», 5-й класс) было зарегистрировано на станциях 13 ($IP' = 74.1\%$), 15 ($IP' = 80.9\%$) и 21 ($IP' = 80.7\%$) (Рис. 1). Среднее для акватории Невской губы значение IP' в 2013 г. составляло $64.1 \pm 3\%$, и воды оценивали как «загрязненные», а состояние экосистемы как «критическое» (Табл. 3). Среднее для акватории курортного района восточной части Финского залива значение IP' в 2013 г. составляло $65.1 \pm 4.4\%$, и воды оценивали так же как и в Невской губе, как «загрязненные», а состояние экосистемы – как «критическое» (Табл. 4). В период 2016–2021 гг. качество воды в среднем для акватории Невской губы было относительно стабильным и воды оценивали по IP' как «загрязненные» (4-й класс), а состояние экосистемы – как «критическое» (Табл. 3).

Начиная с 2012 г. наблюдалось улучшение состояния сообществ зообентоса средней части эстуария, и значения IP' были в основном

ниже многолетних средних (Рис. 5). В 2012–2013 гг. средние значения интегрального показателя IP' снизились до 63.7 ± 4.6 – $65.1 \pm 4.4\%$, в 2016–2019 гг. – до 62.1 ± 2.4 – 63.4 ± 4.9 , характеризуя состояние экосистемы как «критическое» и воды – как «загрязненные» (4-й класс), так же, как и воды Невской губы. Например, в 2017 г. воды в среднем для акватории Невской губы ($IP'=62.1 \pm 2.4\%$), и курортного района восточной части Финского залива ($IP'=61.0 \pm 1.2\%$) оценивали как «загрязненные», а состояние экосистем как – «критическое». Такую степень выровненности качества воды в эстуарии р. Невы наблюдали впервые за весь период исследований (Табл. 3, 4). Однако улучшение качества вод курортного района носило кратковременный характер, и в 2020 г. состояние этой части эстуария ухудшилось и оценивалось, как и в предыдущие годы ($IP'=69.0 \pm 4.0$), как «кризисное», а воды как – «загрязненные–грязные». В 2021 г. состояние курортного района было наихудшим за весь период исследований с 1994 г., значение интегрального показателя IP' возросло до $76.3 \pm 2.5\%$, характеризуя состояние акватории курортного района восточной части Финского залива как «катастрофическое» и воды как – «грязные» (Табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ

Для современного периода характерна крайне сложная экологическая обстановка, так как интенсивное антропогенное воздействие происходит на фоне быстрых климатических изменений, которые в ряде случаев могут усиливать негативные последствия антропогенно-индуцированного экологического стресса (Богатов и Федоровский [Bogatov and Fedorovskii] 2017; Golubkov 2021). При этом климатические изменения могут оказывать не только прямое, но и опосредованное негативное воздействие на состав сообществ водных беспозвоночных (Bogatov and Prozorova 2022). Это в полной мере относится к экологическому состоянию эстуария р. Невы, который на протяжении последних столетий подвергается значительному антропогенному воздействию и загрязнению токсическими и органическими веществами вследствие многоцелевого использования его ресурсов жителями г. Санкт-Петербурга и области. В разные перио-

ды исследований в эстуарии фиксировали повышенные концентрации металлов (кадмия, ртути, меди, цинка, железа), а также нефтеуглеводородов, хлорорганических соединений, фенолов и остатков медицинских препаратов (Фрумин и Крючков [Frumin and Kryuchkov] 1999; Басова и др., [Basova et al.] 2006; Информационный... [Newsletter...] 2008; Chernova et al. 2021).

В 1980 г. воды Невской губы по составу зообентоса характеризовались как α -мезосапробные (Обзор... [A review...] 1981). Эта оценка соответствовала 4–5-му классу вод и была на один класс ниже, чем полученная нами по IP' в 1982–1983 гг. Наиболее неблагоприятные условия в 1980-е гг., как и в 1994–2005 гг., наблюдали в районе Морского порта, воды которого характеризовали как «грязные» (Алексеева [Alekseeva] 1986). В 1990-х и начале 2000 гг. состав сообществ зообентоса в Невской губе значительно изменился в связи с увеличением доминирования олигохет, увеличением роли личинок хирономид и уменьшением доли двустворчатых моллюсков (Балушкина и др. [Balushkina et al.] 2008a, 2008b; Golubkov and Alimov 2010). Оценка качества вод в 90-е гг. по химическим характеристикам совпадала с оценками по интегральному показателю IP' , в частности в 1992 г. воды всех районов Невской губы оценивали по индексу загрязнения вод (ИЗВ) как «загрязненные» (Фрумин и др. [Frumin et al.] 1995; Фрумин и Крючков [Frumin and Kryuchkov] 1999).

В 1992 г. в г. Хельсинки на основании заявок стран-участниц международной комиссии по оздоровлению экологического состояния Балтийского моря (ХЕЛКОМ) и обзоров экологического состояния региона был составлен список зон, представляющих наибольшую угрозу окружающей среде района Балтийского моря. Хельсинкская конвенция была подписана государствами, находящимися на берегах Балтийского моря, а также Европейским сообществом и вступила в силу после ратификации 17 января 2000 г. В 1998 г. Конвенция по защите морской среды района Балтийского моря была одобрена Постановлением Правительства Российской Федерации № 1202 от 15 октября 1998 г. Это способствовало развитию системы канализации, совершенствованию очистки муниципальных и промышленных сточных вод Санкт-Петербурга и пригородов.

Благодаря вводу в эксплуатацию крупных очистных сооружений – Центральной станции аэрации в 1985 г. и Северной станции аэрации в 1987 и 1994 гг., качество воды в Невской губе по показателю IP' во второй половине 1990 гг. – начале 2000 г. значительно улучшилось по сравнению с предыдущими годами (Рис. 5). В 2001 г. по химическим характеристикам воды большей части Невской губы также относили к 4-му классу вод (Басова и др. [Basova et al.] 2002), как и по показателю IP' (Табл. 3). Наблюдалось существенное снижение (примерно в 2 раза) концентраций кадмия, ртути, никеля, марганца. Тем не менее в последующие годы в Невской губе выявлены основные загрязняющие элементы с концентрациями, превышающими предельно допустимые (ПДК): медь, цинк и легкоокисляемые органические вещества (по биологическому потреблению кислорода БПК₅) (Рублевская [Rubevskaya] 2016). Современные исследования показали, что основным источником органического вещества в питании зообентоса в Невской губе до сих пор являются легко усвояемые органические вещества антропогенного происхождения, попадающие со сточными водами в верхнюю часть эстуария р. Невы (Golubkov et al. 2019).

Несмотря на снижение техногенной нагрузки в период спада промышленности на экосистему Невской губы и курортного района восточной зоны Финского залива в 1994–2003 гг. влияние токсического загрязнения на донные сообщества было сильно выражено. К снижению числа видов в эти годы в Невской губе и восточной части Финского залива приводило повышение концентраций хлороформенного битумоида, ртути в воде и донных отложениях, свинца. Причем, если повышение концентрации хлороформенного битумоида, нефтепродуктов и ртути приводило к снижению видового разнообразия и росту численности животных, т.е. доминированию отдельных устойчивых к их действию видов, то повышение концентраций ДДТ приводило к гибели животных и снижению суммарной численности. Изменения структурных характеристик сообществ донных животных отразились на значениях интегрального показателя (IP') и входящих в него индексов. В наибольшей степени на значении индекса IP' отразились концентрации хлороформенного битумоида, ртути, нефтепродуктов, суммарной

взвеси и взвешенного органического вещества. С увеличением их концентрации значения индекса IP' возрастали (Балущкина и др. [Balushkina et al.] 2008b).

Последующие 2004–2007 гг. сопровождалась значительной интенсификацией хозяйственной деятельности на акватории и водосборе эстуария: строительством портов, прокладкой новых и углублением уже имеющихся фарватеров, намывом новых территорий. В результате всех этих крупномасштабных гидротехнических работ в воду Невской губы поступило огромное количество минеральных и органических веществ, концентрация которых в 2007 г. достигла 187 г/м³ и в среднем была в 20 раз выше, чем многолетние средние величины (Golubkov and Golubkov 2022). Как следствие, в годы проведения работ значительно снижалась биомасса и первичная продукция фитопланктона, уменьшалось его биологическое разнообразие (Golubkov and Golubkov 2022; Golubkov et al. 2023). Эти работы привели и к значительному ухудшению экологического состояния зообентоса, величина IP' в 2006 г. достигла максимальных величин для Невской губы (Рис. 5, Табл. 3). Причинами ухудшения состояния донных сообществ были, по-видимому, повсеместное заиление донных биотопов и повторное загрязнение вод и верхних слоев донных осадков в Невской губе токсическими и органическими веществами, ранее захороненными в донных отложениях. В период 2006–2008 гг. наблюдалось увеличение концентраций нефтепродуктов, тяжелых металлов и других поллютантов в донных отложениях и выносы их во внешнюю часть Финского залива. Летом 2007 г. на всех станциях Невской губы ИЗВ, рассчитываемый по химическим характеристикам, указывал на интенсивное загрязнение, связанное с большим количеством поллютантов, поднятых со дна (Информационный бюллетень [Newsletter] 2008; Rybalko et al. 2009; Балущкина [Balushkina] 2011; Golubkov et al. 2011). В 2008 г. концентрации нефтепродуктов (49 г/кг) превысили все наблюдаемые ранее значения, отмечалось катастрофическое обогащение донных осадков токсичными поллютантами, в частности кадмием (Информационный бюллетень [Newsletter] 2008; Golubkov et al. 2011; Rybalko et al. 2016). По сравнению с 90-ми гг. прошлого столетия в 2005–2007 гг. значительно

увеличилась концентрация цинка в придонных водах, и сильно возросло его негативное влияние на видовое богатство и видовое разнообразие донных животных. Статистический анализ показал, что при высоких концентрациях в придонной воде и донных отложениях нефтепродуктов, а также свинца, цинка, цезия ($Cs\ 137$), хрома и мышьяка в 2005–2009 гг. наблюдались самые низкие значения видового богатства и видового разнообразия в сообществах донных животных. С ростом концентрации нефтепродуктов в придонных водах и донных отложениях Невской губы величины интегрального показателя IP' достоверно возрастали (Rybalko et al. 2007, 2016; Golubkov et al. 2011; Balushkina and Golubkov 2019). Качество вод Невской губы характеризовалось по IP' в 2006 г. как наихудшее (4–5-й класс вод) за период наблюдений. В период антропогенного воздействия 2006–2007 гг. существующие связи структурных характеристик зообентоса и функциональных биотических характеристик Невской губы, таких как первичная продукция планктона, были полностью разрушены (Балушкина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2018), поэтому, несмотря на снижение степени эвтрофирования вод (уменьшения величин первичной продукции), улучшения качество вод по показателю IP' не произошло. Анализ парных корреляций структурных характеристик зообентоса, гидрохимических и функциональных характеристик первичных продуцентов Невской губы показал восстановление связей этих показателей в последующие годы (Балушкина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2018).

Последовавшее после 2007 г. улучшение экологического состояния Невской губы (Рис. 5, Табл. 3) было связано с прекращением крупномасштабных дноуглубительных работ на её акватории. Кроме того, вполне вероятно, что улучшение состояния Невской губы в те годы определялось последовательным строительством очистных сооружений и повышением качества очистки сточных вод.

В период 2013–2015 гг. крупномасштабные гидротехнические работы в Невской губе возобновились. Они были связаны со строительством морского многофункционального перегрузочного комплекса «Бронка» и подходного к нему фарватера. В результате средние для акватории

Невской губы значения IP' возросли от 62.8 ± 2 в 2012 г. до 67.6 ± 2.8 % в 2015 г. Состояние экосистемы Невской губы в 2015 г. заметно ухудшилось и оценивалось как «кризисное», воды – как «загрязненные–грязные» (4–5-й класс). Число видов донных животных в эти годы снижалось от 18 ± 1 до 15 ± 2 видов на станции, но индекс видового разнообразия почти не изменялся (от 2.8 ± 0.2 до 2.7 ± 0.2 бит/экз.).

В дальнейшем, учитывая значительное загрязнение от поступающих сточных вод г. Санкт-Петербурга в период 2016–2021 гг., можно констатировать, что качество вод и состояние Невской губы улучшилось незначительно (Рис. 5), значения интегрального показателя IP' изменялись в пределах 4-го класса «загрязненных» вод, а состояние экосистемы оценивалось как «критическое» (Табл. 3). В 2018–2020 гг. совокупные ИЗВ Невской губы к востоку от Комплекса защитных сооружений составили 1.89, 1.99 и 2.03, что определяет воды как «грязные» (5-й класс вод) (Коршенко [Korshenko] 2019, 2020). По интегральному показателю IP' оценка качества вод Невской губы в эти годы была на один класс ниже, чем по гидрохимическим показателям (4-й класс вод).

Влияние эвтрофирования, токсического и органического загрязнения на сообщества донных животных Невской губы оценивали методом множественной (пошаговой) регрессии. Перспективность применения мультирегрессионных моделей для оценки влияния абиотических и биотических факторов среды обитания на распределение, количественное развитие и трофическую структуру макрозообентоса морей убедительно было продемонстрировано в работах С.Г. Денисенко (Денисенко [Denisenko] 2007, 2014). В наших исследованиях данным методом показано, что видовое разнообразие донных животных в Невской губе в значительной степени определялось органическим и токсическим загрязнением (66%), в качестве характеристики которого служил индекс сапротоксности (St) и, в меньшей степени, первичной продукцией (34%). По результатам исследований 1997 г. информативное разнообразие видов в сообществах донных животных снижалось от 3.57 в области наибольшей проточности до 1.5 бит/экз. в юго-западной части губы вблизи г. Ломоносов с увеличением первичной продукции от 0.23 до

0.90 гС/м² сут. (Балушкина и др. [Balushkina et al.] 2008b; Балушкина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2018).

Величины интегрального показателя IP' в Невской губе в 2003–2004 гг. так же, как и структурные и функциональные характеристики сообществ донных животных, зависели от абиотических и биотических факторов. По уровню значимости в определении степени загрязнения (IP') первое место занимала первичная продукция. Значения интегрального показателя (IP') достоверно возрастали (от 48.3 до 72.2) с увеличением первичной продукции и глубины. Уровень значимости деструкции фитопланктона и концентрации общего фосфора был значительно ниже. Степень совпадения рассчитанных и измеренных по структурным характеристикам значений IP' была очень велика ($R = 0.99$, $P = 0.05$) (Балушкина [Balushkina] 2011; Балушкина и др. [Balushkina et al.] 2008b).

В 2003 г. видовое разнообразие зообентоса Невской губы на 100% определяли два отрицательных предиктора – первичная продукция и концентрация хлорофилла *a*. Отличие этой мультирегрессии от полученной в более ранний период 1997 г. заключалось в возросшем влиянии концентраций хлорофилла *a* и первичной продукции планктона. Средняя для акватории Невской губы концентрация хлорофилла *a* с 1997 по 2003 гг. увеличилась в 1.5 раза с 8.55 до 12.67 мкг/л. Как показано, в 2003 г. с увеличением первичной продукции от 0.38 гС/(м² сут.) до 0.95 гС/(м² сут.) и концентрации хлорофилла *a* от 6.15 до 16.85 мкг/л эти факторы в равной степени (по 50%) достоверно обуславливали снижение индексов видового разнообразия от 3.70 до 2.50 бит/экз. (Балушкина и др. [Balushkina et al.] 2008b; Балушкина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2018).

В 2012 г. концентрации хлорофилла *a* в Невской губе значительно снизились (в среднем в 1.5 раза), а величины деструкции органических веществ увеличились, что выделило этот показатель в качестве основного, определяющего видовое разнообразие в Невской губе. Кроме того, было показано, что концентрация хлорофилла *a* в 2012 г. достоверно обуславливала биомассу макрозообентоса в качестве положительного предиктора всего на 15%, что в 3 раза ниже, чем в 2003–2004 гг. В качестве основного

отрицательного предиктора, как и в 2003–2004 гг., биомассу макрозообентоса лимитировала первичная продукция (27%). В целом эвтрофирование Невской губы на фоне токсического загрязнения приводило к снижению биологического разнообразия сообществ донных животных при величинах первичной продукции 0.9 гС/м² и более (граница мезотрофных и эвтрофных водоемов – 0.7 гС/м² сут. (Балушкина и Голубков [Balushkina and Golubkov] 2018).

По сравнению с Невской губой условия обитания животных в восточной части Финского залива были более неблагоприятны. Наблюдающаяся там соленость воды до 5‰ отрицательно влияет как на пресноводные, так и на солоноватоводные организмы (Хлебович [Khlebovich] 1974). Кроме того, геохимические процессы при этой солености приводят к переводу части химических веществ из раствора во взвесь и дальнейшей аккумуляции в донных осадках. Как следствие, в таких солоноватоводных барьерных зонах осаждаются более 70% загрязняющих веществ, поступающих в эстуарий реки Нева (Рыбалко и Федорова [Rybalko and Fedorova] 2008). По всем этим причинам и вследствие сильного эвтрофирования и загрязнения состояние средней части эстуария (курортного района восточной части Финского залива) было более неблагоприятным, чем в Невской губе (Табл. 3, 4). Средняя величина IP' зообентоса за все время наблюдений в средней части эстуария составляла 67.7%, тогда как в Невской губе она была заметно ниже: 62.9%.

Влияние антропогенного воздействия на зообентос курортного района восточной части Финского залива также было достаточно сильно выражено. Это подтверждается зависимостью IP' от биохимического потребления кислорода в эпипланктоне (БПК_{5эпи}) на 12 станциях, исследованных в 2001 г. Как показали результаты мультирегрессионного анализа, величины IP' в восточной части Финского залива в 2001 г. в значительной степени определялись значениями БПК_{5эпи}, уровень достоверности влияния солености был ниже (Балушкина и др. [Balushkina et al.] 2008b).

В курортном районе восточной части Финского залива средние значения интегрального показателя IP' изменялись в 2012–2013 гг. от 63.7±5% до 65.1±4%, характеризуя состояние

экосистемы как «критическое», а воды как – «загрязненные» (4-й класс вод) так же, как и воды Невской губы. В 2014–2015 гг. состояние этой части эстуария значительно ухудшилось и оценивалось, как и в предыдущие годы (1994–2011) как «кризисное», а воды – как «загрязненные–грязные» (4–5-й класс). Вследствие загрязнения видовое разнообразие и видовое богатство донных животных в курортной зоне восточной части Финского залива было значительно ниже, чем в Невской губе (Рис. 2).

Основной вклад в загрязнение вод курортного района восточной части Финского залива вносили железо, легкоокисляемые органические вещества (по БПК₅) и медь (Коршенко [Korshenko] 2019, 2020) в 2018–2020 гг. Совокупный ИЗВ изменялся от 1.29 до 1.69 (4-й класс вод) (Коршенко [Korshenko] 2019, 2020). Эта оценка в 2018 и 2019 гг. совпадала с оценкой по интегральному показателю IP', а в 2020 г. оценка по IP' была на один класс ниже (4–5-й класс вод по IP' соответствует V классу вод по ИЗВ).

Помимо антропогенных факторов, на состояние экосистемы Финского залива существенное влияние оказывают колебания климата (Golubkov and Alimov 2010; Golubkov and Golubkov 2021). Было показано, что межгодовые колебания концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции планктона в эстуарии р. Невы за последние 50 лет с высокой степенью достоверности определяются изменением атмосферных процессов, характеризуемых рядом климатически индексов: Северо-Атлантической осцилляцией, Скандинавским и Полярно-Евразийским индексами (Golubkov and Golubkov 2021).

Механизмы влияния атмосферных процессов на водные экосистемы весьма разнообразны (Golubkov 2021). Например, положительная аномалия Северо-Атлантической осцилляцией, которая преобладала в 2011–2019 гг. в регионе эстуария р. Невы, проявлялась там в ветреной и дождливой погоде и мягких зимах в районе эстуария р. Невы в указанные годы (Golubkov and Golubkov 2020, 2021). Такой характер погоды увеличивает поверхностный сток биогенных элементов с водосбора, что ведет к повышению первичной продукции планктона, способствует перемешиванию толщи воды и насыщению придонных слоев воды кислородом во время осенней и весенней гомотермии, а также сокращает про-

должительность ледового покрова. Все это улучшает условия существования для донных животных, поэтому наблюдавшееся в 2011–2019 гг. улучшение состояния сообществ зообентоса средней части эстуария р. Невы в значительной степени объясняется благоприятными для развития зообентоса климатическими факторами.

Противоположные тенденции в развитии экологического состояния сообществ зообентоса наблюдались во второй половине 1990 гг. и в первой декаде XXI века, когда величины индекса IP' были, как правило, значительно ниже многолетних средних (Рис. 5). Этот период отмечился менее благоприятной климатической обстановкой, частой придонной гипоксией и многократным уменьшением биомассы донных животных на значительных участках дна восточной части Финского залива (Golubkov and Alimov 2010; Maximov 2015). Особенно сильно пострадали чувствительные к гипоксии популяции гляциальных реликтов – донных ракообразных, *Monoporeia affinis* (Lindstrom, 1855) и *Saduria entomon* (Linnaeus, 1758), которые до этого доминировали в зообентосе залива. Все это негативно сказалось на функционировании экосистемы восточной части Финского залива: многократно уменьшилась эффективность передачи энергии от продуцентов к консументам и значительно понизилась рыбопродуктивность экосистемы (Golubkov et al. 2010). Деградация сообществ зообентоса нашла отражение в увеличении величин индекса IP' (Рис. 5, Табл. 4) вследствие неблагоприятных изменений в состоянии экосистемы Финского залива.

В дальнейшем при благоприятных изменениях климата в 2011–2019 гг. состояние зообентоса заметно улучшилось, возросла его биомасса. Однако структура донных сообществ существенно изменилась. Популяции придонных нектонных ракообразных *M. affinis* и *S. entomon* не восстановились. Их биомассы остались на крайне низком уровне, а доминирующим видом стал чужеродный вид полихет *M. arctica* (Golubkov et al. 2017, 2021b). Это повлекло важные перестройки в структуре трофических связей донных сообществ, т.к. в отличие от донных ракообразных этот червь зарывается в глубокие норки в донных отложениях, что делает его малодоступной пищей для рыб (Golubkov et al. 2021b). Отсутствие пресса рыб

способствовало значительному развитию пищевой цепи, связанной с *M. arctia*, которая, в отличие от нативных пищевых цепей, связанных с ракообразными, не обеспечивает передачу энергии от автохтонного и аллохтонного органического вещества на верхние трофические уровни в экосистеме залива (Golubkov et al. 2021b). Таким образом, полного восстановления структуры и продуктивности донных сообществ не произошло, что подтверждает общее правило о низкой вероятности полного восстановления состояния экосистемы, подвергшейся экологическому стрессу (Golubkov et al. 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долговременные исследования эстуария р. Невы, подвергающегося загрязнению смешанного характера органическими и токсическими веществами, потребовали применения широкого набора существующих и разработки новых методов оценки качества воды и состояния экосистем. Загрязнение органическими веществами способствовало эвтрофированию эстуария. Проводили единовременные исследования влияния токсического загрязнения на зообентос в разные периоды наблюдений. В частности, было показано, что при высоких концентрациях нефтепродуктов в придонной воде и донных отложениях, свинца, цинка, цезия ($Cs\ 137$), хрома и мышьяка в период 2005–2009 гг. наблюдались самые низкие значения видового богатства и видового разнообразия в сообществах донных животных.

Нарушения донного рельефа, связанные с постоянным масштабным гидростроительством, вызывающим загрязнение взвесью и вторичное загрязнение тяжелыми металлами и нефтепродуктами придонных вод, приводили к снижению видового богатства и видового разнообразия, численности и биомассы и в ряде случаев – к деградации сообществ донных животных. Разработка и применение интегрального показателя IP' позволила достаточно достоверно оценивать качество воды в течение долговременных исследований в Невской губе и средней части эстуария р. Невы – Курортном районе восточной части Финского залива.

Единовременные исследования гидрохимических характеристик воды и функциональных показателей первичных продуцентов планктона

позволили провести анализ влияния этих показателей на структурные характеристики зообентоса в разные периоды исследований. С помощью множественных регрессий оценивали влияние биотических и абиотических факторов на структурные и функциональные характеристики сообществ донных животных в Невской губе. Применение данного анализа позволило установить, что эвтрофирование Невской губы на фоне токсического загрязнения приводило к снижению биологического разнообразия сообществ донных животных при величинах первичной продукции $0.9\ гС/м^2$ и более. Кроме того, было установлено, что низкие величины первичной продукции, связанные с повышением концентрации минеральной взвеси и снижением прозрачности в 2007 г., определяли недостаточное поступление органической фракции сестона на дно, что, в свою очередь, лимитировало развитие донных животных. Нереализованные концентрации общего фосфора также выступали в качестве отрицательных предикторов по отношению к биомассе зообентоса. Единовременное снижение численности, биомассы и биоразнообразия приводило к деградации сообществ донных животных, а при последовательном ухудшении качества воды может вызывать катастрофические последствия для экосистем водоемов.

В отличие от верхней части эстуария, Невской губы, где экологическое состояние определялось главным образом интенсивностью органического и токсического загрязнения вод, широкомасштабными гидротехническими работами и контрмерами по оздоровлению экологической обстановки (строительством очистных сооружений), динамика состояния зообентоса восточной части Финского залива в значительной степени определялась влиянием климатических факторов и вселением чужеродных видов. Тем не менее и в этой части эстуария степень антропогенного воздействия во все периоды наблюдений была очень высока, что нашло закономерное отражение в высоких значениях интегрального показателя IP' .

Оценка качества вод и состояния экосистем по интегральным показателям, основанным на совокупности индексов, всесторонне описывающих изменения сообществ донных животных на видовом уровне и на уровне таксонов более высокого ранга с учетом их индикаторного

значения, обладает рядом преимуществ. Главное достоинство интегральных показателей – возможность использовать реакцию разных групп животных на различные химические вещества и тем самым сделать оценку качества вод более адекватной. Для разработки экологических норм антропогенного воздействия на водоемы необходимы интегральные показатели, позволяющие получить значимые связи структурных и функциональных характеристик сообществ донных животных с ключевыми факторами среды обитания и качеством воды.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использованы фондовые коллекции Зоологического института. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ЗИН РАН № 122031100274-7.

ЛИТЕРАТУРА

- A review of the state of aquatic objects by hydrobiological parameters on the territory of SZUGKS in 1980. 1981.** North-Western Territorial Administration for Hydrometeorological and Environmental Monitoring, Leningrad, 201 p. [In Russian].
- Alekseeva N.A. 1986.** Zoobenthos. Review of pollution of the eastern Gulf of Finland by hydrobiological characteristics in 1985. State committee of the USSR for hydrometeorology and environmental monitoring. Northwestern territorial department for hydrometeorology and environmental monitoring. Northwestern territorial department, Leningrad: 243–255. [In Russian].
- Alimov A.F. and Golubkov S.M. 2008.** Changes in the ecosystems of the eastern Gulf of Finland. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, **78**(3): 115–125. <https://doi.org/10.1134/S1019331608020019>
- Balushkina E.V. 1987.** Functional significance of chironomid larvae in continental reservoirs. Nauka, Leningrad, 180 pp. [In Russian].
- Balushkina E.V. 2009.** Assessment of the Neva estuary ecosystem state on the basis of structural characteristics of benthic animal communities in 1994–2005. *Inland Water Biology*, **2**(4): 355–363. <https://doi.org/10.1134/S1995082909040105>
- Balushkina E.V. 2011.** Assessment of the quality of waters and the state of water bodies and watercourses in the north-west of Russia according to the characteristics of communities of benthic animals. In: D.S. Pavlov, G.S. Rosenberg and M.I. Shatunovsky (Eds). Questions of ecological regulation and development of a system for assessing the state of water bodies. A.N. Severtsov Institute for Problems of Ecology and Evolution, Moscow: 69–101. [In Russian].
- Balushkina E.V. and Finogenova N.P. 2003.** Changes in benthic community structure and assessment of state and quality of waters of ecosystems of the Neva Bay and the Gulf of Finland in 1994–2001. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology, Ecology*, **52**(4): 365–377. <https://doi.org/10.3176/biol.ecol.2003.4.01>
- Balushkina E.V. and Golubkov S.M. 2015.** Biodiversity of communities of benthic animals and water quality in the Neva River estuary under anthropogenic stress. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, **319**(2): 229–243. [In Russian]. <https://doi.org/10.31610/trudyzin/2015.319.2.229>
- Balushkina E.V. and Golubkov S.M. 2018.** Water quality and biodiversity of benthic animals in the Neva estuary under anthropogenic stress. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, **11**(2): 51–61. <https://doi.org/10.7868/S2073667318020041>
- Balushkina E.V. and Golubkov M.S. 2018.** Influence of the environmental factors on species diversity and quantitative development of zoobenthos in the Neva Bay. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, **322**(1): 50–65. [In Russian]. <https://doi.org/10.31610/trudyzin/2018.322.1.50>
- Balushkina E.V. and Golubkov M.S. 2019.** Long-term changes in the biodiversity of benthic communities in the Neva estuary under anthropogenic stress. Thesis collection: XX International Environmental Forum “Baltic Sea Day” (21–22 March 2019, Saint Petersburg). Mineral, Saint Petersburg: 172–174.
- Balushkina E.V. Golubkov S.M., Golubkov M.S. and Maksimov A.A. 2008a.** The role of anthropogenic factors in the dynamics of zoobenthic communities. In: A.F. Alimov and S.M. Golubkov (Eds). Ecosystem of the Neva River estuary: biodiversity and ecological problems. KMC Press, Moscow: 356–371. [In Russian].
- Balushkina E.V., Maksimov A.A. and Golubkov S.M. 2008b.** Zoobenthos of the open waters of the Neva River estuary. In: A.F. Alimov and S.M. Golubkov (Eds). Ecosystem of the Neva River estuary: biodiversity and ecological problems. KMC Press, Moscow: 156–184. [In Russian].
- Basova S.L., Kobeleva N.I., Leonova M.V. and Frumin G.T. 2002.** Characterization of the state of the Neva Bay by hydrochemical indices in 2001. In: D.A. Golubev and N.D. Sorokin (Eds). Environmental protection, nature management and providing ecological safety in Saint-Petersburg in 2001. Committee for Natural Resource Management, Environmental Protection and Provision of Environmental Safety, Saint Petersburg: 175–182. [In Russian].
- Basova S.L., Rybalko A.E. and Fedorova N.K. 2006.** Results of state monitoring of the eastern part of the

- Gulf of Finland carried out by the branches of the Russian hydrometeorological service and the Ministry of nature resources of the Russian Federation. Thesis Collection: VII International Environmental Forum "Baltic Sea Day" (21–22 March 2007, Saint Petersburg). Color-Print, Saint Petersburg: 83–86. [In Russian].
- Bogatov V.V. and Fedorovskii A.S. 2017.** Principles of river hydrology and hydrobiology. Dal'nauka, Vladivostok, 384 p. [In Russian].
- Bogatov V.V. and Prozorova L.A. 2022.** Caddisflies *Stenopsyche marmorata* (Trichoptera: Hydropsychidae) exploit river mussels as anchors for their nets. *Far Eastern Entomologist*, **461**: 31–36. <https://doi.org/10.25221/fee.461.3>
- Chernova E., Zhakovskaya Z. and Berezina N. 2021.** Occurrence of pharmaceuticals in the Eastern Gulf of Finland (Russia). *Environmental Science and Pollution Research*, **28**: 68871–68884. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15250-1>
- Criteria of assessment of ecological situation of territories for revealing zones of emergency ecological situation and ecological disaster. 1992.** The Ministry of Protection of Environment, Moscow, 58 p. [In Russian].
- Denisenko S.G. 2007.** Zoobenthos of the Barents Sea in the face of changing climate and anthropogenic impact. In: V.G. Tarasov (Ed.). Dynamics of marine ecosystems and conditions for the formation of the biological potential of the seas. Dal'nauka, Vladivostok: 418–511. [In Russian].
- Denisenko S.G. 2013.** Biodiversity and bioresources of macrozoobenthos in the Barents Sea. Structure and long-term changes. Nauka, Saint Petersburg, 283 p. [In Russian].
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. 2000.** *Official Journal of the European Communities*, L 327 22/12/2000: 1–73.
- Federal Law No. 7-FZ dated January 10, 2002 "On Environmental Protection". 2002.** Adopted by the State Duma on December 20, 2001, approved by the Federation Council on December 26, 2001, 31 p. [In Russian].
- Frumin G.T. and Basova S.L. 2008.** Physico-geographical description of the eastern part of the Gulf of Finland. In: A.F. Alimov and S.M. Golubkov (Eds). Ecosystem of the Neva River estuary: biodiversity and ecological problems. KMK Press, Moscow: 16–19. [In Russian].
- Frumin G.T. and Kryuchkov A.M. 1999.** Hydrochemical characteristics. In: V.A. Romyantsev and V.G. Drabkova (Eds). Gulf of Finland under anthropogenic impact. Institute of Limnology RAS, Saint Petersburg: 48–65. [In Russian].
- Frumin G.T., Skakalsky B.G. and Drabkova V.G. 1995.** State and pollution of surface waters. State of the environment of the northwestern and northern regions of Russia. Nauka, Saint Petersburg: 86–91. [In Russian].
- Golubkov M.S. 2009.** Phytoplankton primary production in the Neva Estuary at the turn of the 21st century. *Inland Water Biology*, **2**: 312–318. <https://doi.org/10.1134/S199508290904004X>
- Golubkov M. and Golubkov S. 2020.** Eutrophication in the Neva Estuary (Baltic Sea): response to temperature and precipitation patterns. *Marine and Freshwater Research*, **71**: 583–595. <https://doi.org/10.1071/MF18422>
- Golubkov M. and Golubkov S. 2021.** Relationships between northern hemisphere teleconnection patterns and phytoplankton productivity in the Neva Estuary (northeastern Baltic Sea). *Frontiers in Marine Science*, **8**: 735790. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.735790>
- Golubkov M. and Golubkov S. 2022.** Impact of the construction of new port facilities on primary production of plankton in the Neva Estuary (Baltic Sea). *Frontiers in Marine Science*, **9**: 851043. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.851043>
- Golubkov M.S., Nikulina V.N. and Golubkov S.M. 2021a.** Species-level associations of phytoplankton with environmental variability in the Neva Estuary (Baltic Sea). *Oceanologia*, **63**: 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.11.002>
- Golubkov M.S., Nikulina V.N. and Golubkov S.M. 2023.** Impact of the construction of new port facilities on the biomass and species composition of phytoplankton in the Neva Estuary (Baltic Sea). *Journal of Marine Science and Engineering*, **11**(1): 32. <https://doi.org/10.3390/jmse11010032>
- Golubkov S.M. 2008.** Factors affecting the role of macrobenthos in pelagic-benthic coupling in the Neva Bay (eastern Gulf of Finland). Electronic Proceedings of International Symposium US/EU-Baltic 2008. Tallinn, 2008. <https://doi.org/10.1109/BAL-TIC.2008.4625566>
- Golubkov S.M. 2021.** Effect of climatic fluctuations on the structure and functioning of ecosystems of continental water bodies. *Contemporary Problems of Ecology*, **14**(1): 1–10. <https://doi.org/10.1134/S1995425521010030>
- Golubkov S.M. and Alimov A.F. 2010.** Ecosystem changes in the Neva Estuary (Baltic Sea): Natural dynamics or response to anthropogenic impacts? *Marine Pollution Bulletin*, **61**: 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.02.014>
- Golubkov S.M., Balushkina E.V. and Golubkov M.S. 2020.** Restoration of zoobenthic communities and water quality in the river ecosystem after a decrease in the level of organic pollution. *Contemporary Problems of Ecology*, **13**(2): 146–155. <https://doi.org/10.1134/S1995425521010030>
- Golubkov S.M., Balushkina E.V., Rybalko A.E. Berezina N.A., Maximov A.A., Gubelit Yu.I. and Golub-**

- kov M.S. 2011.** Quality of water and bottom deposits in the Russian part of the Gulf of Finland by hydrobiological indices. Thesis Collection: X International Environmental Forum "Baltic Sea Day" (17–19 March 2009, Saint Petersburg). Color-Print, Saint Petersburg: 311–312.
- Golubkov S.M., Golubkov M.S. and Tiunov A.V. 2019.** Anthropogenic carbon as a basal resource in the benthic food webs in the Neva Estuary (Baltic Sea). *Marine Pollution Bulletin*, **146**: 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.037>
- Golubkov S., Golubkov M., Tiunov A. and Nikulina V. 2017.** Long-term changes in primary production and mineralization of organic matter in the Neva Estuary (Baltic Sea). *Journal of Marine Systems*, **171**: 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.12.009>
- Golubkov S.M., Maximov A.A., Golubkov M.S. and Litvinchuk L.F. 2010.** A functional shift in the ecosystem of the eastern Gulf of Finland caused by natural and anthropogenic factors. *Doklady Biological Sciences*, **432**: 198–200. <https://doi.org/10.1134/S0012496610030099>
- Golubkov S., Tiunov A. and Golubkov M. 2021b.** Food-web modification in the eastern Gulf of Finland after invasion of *Marenzelleria arctica* (Spionidae, Polychaeta). *NeoBiota*, **66**: 75–94. <https://doi.org/10.3897/neobiota.66.63847>
- Goodnight C.J. and Whitley L.S. 1961.** Oligochaetes as indicators of pollution. *Proceedings of the 15th Industry Waste Conference*, **106**: 139–142.
- Israel Yu.A. and Abakumov V.A. 1991.** On the ecological state of the surface waters of the USSR and the criteria for environmental regulation. In: V.A. Abakumov (Ed.). Ecological modifications and criteria for ecological regulation. Nauka, Leningrad: 7–17. [In Russian].
- Jakovlev V.A. 1988.** The assessment of freshwaters quality of Kola North for hydrobiological parameters and the data of toxicity tests. Kola Branch AS USSR, Apatity, 25 p. [In Russian].
- Khlebovich V.V. 1972.** Critical salinity of biological processes. Nauka, Leningrad, 235 p. [In Russian].
- Korshenko A.N. (Ed.) 2019.** The quality of sea waters by hydrochemical parameters. Nauka, Moscow: 125–173. [In Russian].
- Korshenko A.N. (Ed.) 2020.** The quality of sea waters by hydrochemical parameters. Nauka, Moscow: 230 p. [In Russian].
- Levich A.P., Bulgakov N.G. and Maksimov V.N. 2004.** Theoretical and methodological foundations of the technology of regional control of the natural environment according to environmental monitoring data. NIA-Priroda, Moscow, 271 p.
- Levich A.P., Bulgakov N.G., Maksimov V.N. and Risnik D.V. 2011.** "In situ" – a technology for establishing local ecological norms. In: D.S. Pavlov, G.S. Pozenberg and M.I. Shatunovsky (Eds). Problems of ecological standardization and development of a quality assessment system for water bodies. KMK, Moscow: 30–55.
- Maximov A.A. 2015.** The long-term dynamics and current distribution of macrozoobenthos communities in the eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *Russian Journal of Marine Biology*, **41**(4): 300–310. <https://doi.org/10.1134/S1063074015040094>
- Newsletter No 10. 2008.** Status of the geological environment in the nearshore shelf zone of the Barents, White, and Baltic seas. FGUNPP Sevmorgeo. Sevmorgeo, Saint Petersburg, 50 p. [In Russian].
- Rublevskaya O.N. 2016.** Evaluation of the impact of domestic wastewater on the quality of wastewater in the drainage system. Thesis Collection: XVII International Ecological Forum "Baltic Sea Day" (21–23 March 2016, Saint Petersburg). House LLC "Own Publishing House", Saint Petersburg: 78–79. [In Russian].
- Rybalko A.E. and Fedorova N.K. 2008.** Bottom sediments of the Neva River estuary and their pollution under the influence of anthropogenic processes. In: A.F. Alimov and S.M. Golubkov (Eds). Ecosystem of the Neva River estuary: biodiversity and ecological problems. KMC Press, Moscow: 39–59. [In Russian].
- Rybalko A.E., Korneev O.Yu., Ivanov G.I., Fedorova N.K. and Verba M.L. 2007.** The state of the geological environment of the Baltic Sea (geological hazards, exogenous processes) in conditions of increasing anthropogenic pressure. Thesis Collection: XIII International Ecological Forum "Baltic Sea Day" (21–23 March 2012, Saint Petersburg). Dialog Publishing, Saint Petersburg: 323–324.
- Rybalko A.E., Korneev O.Yu., Korneeva E.V., Loktev A.S. and Terekhina Ya.E. 2016.** Chemical contamination of sediments, GOF-2014 results and perspectives of geoecological monitoring of the eastern Gulf of Finland. Thesis Collection: XVII International Environmental Forum "Baltic Sea Day" (21–23 March 2016, Saint Petersburg). Publishing House LLC "Own Publishing House", Saint Petersburg: 230–232.
- Rybalko A.E., Zhakovskaya Z.A., Khoroshko L.O., Petrova V.N., Tsarev V.S. and Nikonov V.A. 2009.** Results of estimation of some hazardous substances contents in bottom sediments samples of Eastern part of Gulf of Finland (according to the Rosnedra federal monitoring). Thesis Collection: X International Environmental Forum "Baltic Sea Day" (21–23 March 2009, Saint Petersburg). Maxi-Print, Saint Petersburg: 418–419.
- Telesh I.V., Golubkov S.M. and Alimov A.F. 2008.** The Neva estuary ecosystem. In: U. Schiewer (Ed.). Ecology of Baltic coastal waters. Ecological Studies 197. Springer, Berlin–Heidelberg: 259–284. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3_12
- Woodiwiss F.S. 1964.** The biological system of stream classification used by the Trent River Board. *Chemistry and Industry*, **11**: 443–447.